



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 8 - Jul/2026

ISSN-2966-0726

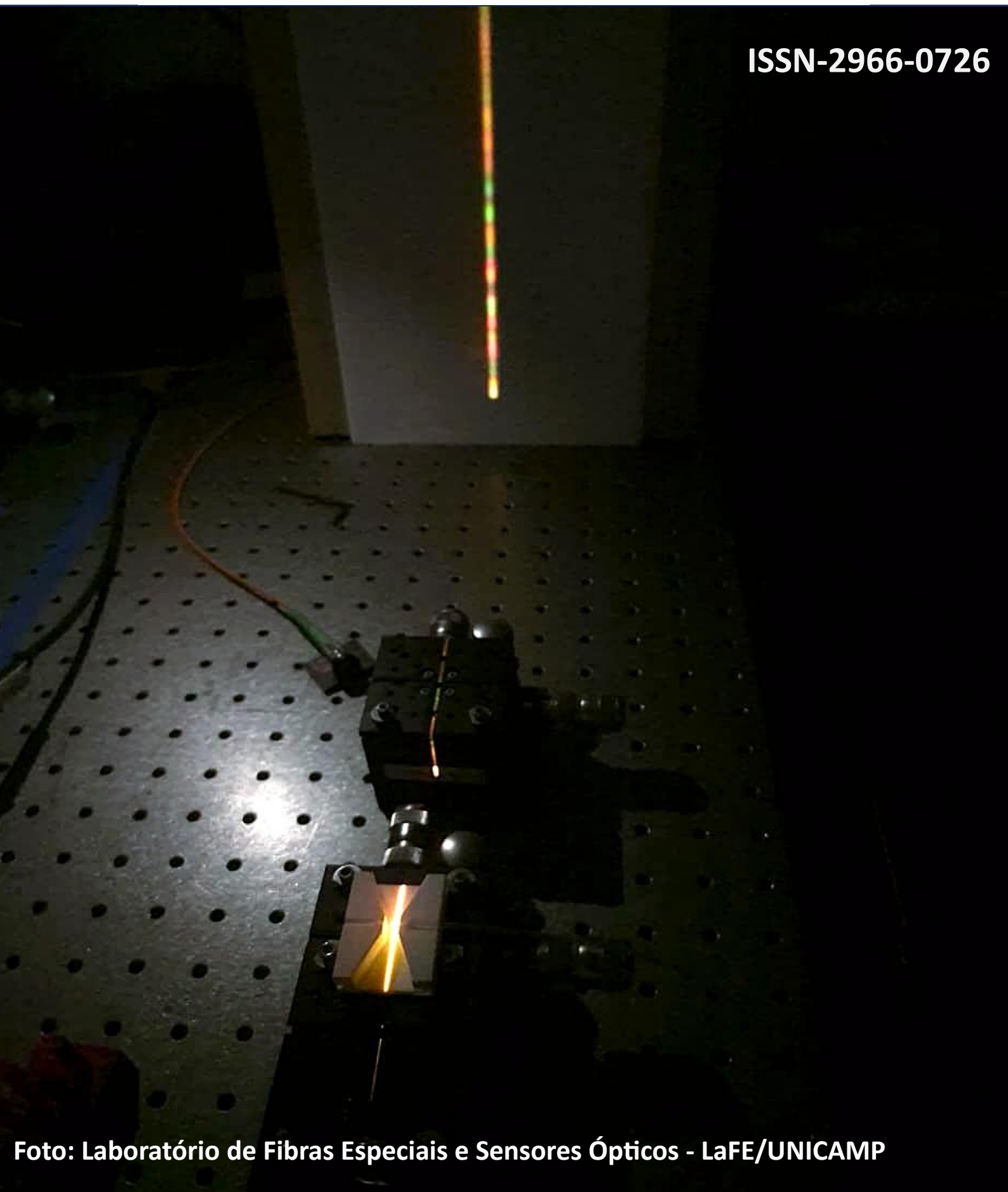


Foto: Laboratório de Fibras Especiais e Sensores Ópticos - LaFE/UNICAMP



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 8 - Jul/2026

Revista de divulgação científica da Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica

Expediente

Editor-chefe

Jonas Henrique Osório

Corpo Editorial: Alexandre de Almeida Prado Pohl, Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro, Luciana Reyes Pires Kassab, Marcio Peron Franco de Godoy

Colaboradores: Gabriela Pinheiro

Autores dos artigos

Diogo B. Almeida, Jhonattan C. Ramirez, Jorge R. Mejía-Salazar, Lazaro A. Padilha, Leonardo Barros, Luigi Pieri e Luiz Henrique Bonani

Diretoria SBFoton

Presidente: Denise Maria Zezell/ IPEN

Diretor Administrativo: Eric Fujiwara/ UNICAMP

Diretor de Relações Institucionais: Hugo Enrique Hernandez Figueroa/ UNICAMP

Diretor de Relações com Empresas: Bruno Rodrigues Gama/ ANRITSU

Diretor de Eventos: Herculano da Silva Martinho/ UFABC

Diretor de Publicações: Jonas Henrique Osório/ UFLA

Diretor de Educação: Luciana Reyes Pires Kassab/ FATEC-SP

ISSN 2966-0726

Os artigos publicados nesta Revista representam a visão e opinião dos autores e podem não representar a opinião da Editoria da Revista.

ENDEREÇO

Cidade universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400.
Distrito de Barão Geraldo, CEP 13083-852 - Campinas - SP

Carta do Editor

Com grande satisfação, apresentamos o novo volume da Revista da SBFoton, uma edição que reafirma o compromisso de nossa comunidade com a disseminação de pesquisas de ponta em um formato mais geral e acessível.

Neste volume, os leitores encontrarão contribuições que abordam desde frentes científicas de fronteira até soluções didáticas e de popularização da ciência. Discutimos aqui o potencial da espectroscopia multidimensional coerente na superação de desafios de caracterização de nanoestruturas, bem como avanços recentes em biossensores plasmônicos voltados ao diagnóstico e monitoramento biomolecular. Alinhados com a missão de tornar o ensino experimental de comunicações ópticas mais inclusivo e escalável, trazemos também o projeto de um aparato WDM de baixo custo. Além disso, celebramos o protagonismo estudantil por meio da trajetória do USP - IFSC OPTICA *Student Chapter* e de sua dedicação à divulgação científica.

Gostaria de expressar meu sincero agradecimento a todos os autores que aceitaram o desafio de transpor suas pesquisas e experiências para a linguagem de divulgação científica. É este esforço conjunto que permite à SBFoton aproximar a ciência da sociedade e despertar novas vocações em fotônica.

Desejo a todos uma excelente e proveitosa leitura!



Jonas Henrique Osório
Editor-Chefe

Mensagem da Presidente

É com grande satisfação que a Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica apresenta o oitavo volume da Revista da SBFoton, cujo conteúdo segue refletindo a excelência, a diversidade e o impacto da pesquisa nacional em óptica e fotônica.

Esta edição traz destaques científicos e didáticos de grande relevância para a nossa comunidade. No campo das novas tecnologias e instrumentação, exploramos o potencial da espectroscopia multidimensional coerente na caracterização de nanoestruturas e o avanço dos biossensores plasmônicos para a detecção de biomarcadores. Demonstrando o compromisso com o ensino inovador, apresentamos o desenvolvimento de um aparato didático para a demonstração prática de sistemas WDM. Por fim, celebramos a trajetória de divulgação científica e extensão do USP - IFSC *OPTICA Student Chapter*, acompanhada por uma lúdica tirinha dedicada a Pierre de Fermat.

A SBFoton reitera seu constante esforço e dedicação para promover a difusão da ciência e fortalecer a comunidade de ótica e fotônica em nosso país. Desejamos a todos uma leitura instrutiva, inspiradora e gratificante!

Estendemos também as boas-vindas à nossa comunidade para o próximo [congresso da SBFoton](#), a ser realizado em Campinas entre os dias 12 e 14 de agosto.



Denise Maria Zezell

Presidente da SBFoton

SUMÁRIO

3 Carta do Editor

4 Mensagem da Presidente

6 Notícias da SBFoton

7 *Chapters no Brasil: USP - IFSC OPTICA Student Chapter*

10 Espectroscopia multidimensional coerente como ferramenta de caracterização de nanoestruturas

24 Biossensores plasmônicos: usando luz e nanoestruturas para encontrar biomarcadores

31 Aparato didático de baixo custo para demonstração experimental de um sistema WDM

NOTÍCIAS DA SBFOTON

A [SBFoton](#), fundada em 2017, é pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil sem fins lucrativos, exclusivamente de caráter científico, tecnológico e de inovação. Seus objetivos são o incremento da pesquisa e inovação em ótica e fotônica e a criação no Brasil de um ambiente propício ao seu desenvolvimento.

Seus associados são docentes, pesquisadores, empresários, engenheiros, técnicos, estudantes e empresas, todos interessados no estudo, desenvolvimento e aplicação da luz em diversas áreas do conhecimento.

Faça parte desta sociedade clicando [aqui](#).

NEWSLETTER

A *Newsletter da SBFoton* é um veículo de comunicação quinzenal com as principais notícias de Ótica e Fotônica do Brasil e do mundo. Com quase 200 edições, conta com editorias especializadas em biofotônica, comunicações e redes óticas, lasers, ótica e instrumentação, ótica integrada e sensores. Além das notícias técnicas, divulga também convites para eventos, conferências e oportunidades profissionais e acadêmicas.

[Acesse](#) as edições anteriores e [assine](#) nossa newsletter.

EVENTOS

Neste ano, temos o prazer de anunciar o Encontro Nacional da SBFoton 2026 (ENSBFoton 2026), que será realizado de 12 a 14 de agosto de 2026, na Unicamp. O evento abordará tecnologias relacionadas à óptica e fotônica, incluindo comunicações ópticas, fibras ópticas e suas aplicações, instrumentos ópticos e metrologia, lasers, óptica integrada e optoeletrônica, sensoriamento, imagem, iluminação, tecnologias quânticas ópticas, agrofotônica e biofotônica.

As [inscrições](#) para participação no ENSBFoton 2026 já estão abertas e poderão ser realizadas até o dia 14 de agosto de 2026. A programação inclui o Workshop de Indústria e Empreendedorismo em Fotônica, minicursos, exposições técnicas e sessões orais e de pôsteres para apresentação de trabalhos científicos avaliados por pares.

Os trabalhos aprovados serão publicados na próxima edição da Revista SBFoton, uma edição especial com foco em ampliar a visibilidade da produção científica apresentada durante o encontro.





sbfoton

CHAPTERS NO BRASIL

USP - IFSC OPTICA Student Chapter

O [USP - IFSC OPTICA Student Chapter](#), fundado em 2005 por estudantes do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), sob a supervisão do professor Cleber Renato Mendonça, tem construído uma trajetória marcada pela formação de estudantes, divulgação científica e reconhecimento internacional. Sua atuação se expandiu por meio da colaboração com outros capítulos estudantis do campus: o [USP - SC IEEE Photonics Student Chapter](#) e o [USP - SC SPIE Student Chapter](#).

Em 2012, recebeu o *Student Chapter Excellence Award* da *Optica*, em Nova York, em uma cerimônia que contou com a presença de Donna Strickland, então vice-presidente da OSA e futura laureada com o Prêmio Nobel de Física de 2018. Outra iniciativa com relevância internacional é o *SPIE Talks*, ciclo de palestras organizado pelos membros dos *Chapters* que já recebeu virtualmente a laureada com o Prêmio Nobel de Física de 2023 Anne L'Huillier.

Os *Chapters* também promovem anualmente o *Ciência por Elas*, evento dedicado à valorização e ao fortalecimento da presença feminina na ciência. Além de minicursos voltados para estudantes de graduação do IFSC e a promoção de visitas a escolas públicas de São Carlos, levando atividades sobre óptica geométrica e biofotônica.

Como próximo passo dessa trajetória, os *Chapters* organizam o [Optics Exchange 2026](#), que será realizado de 08 a 10 de setembro de 2026 no IFSC.

DISCENTE ORGANIZADOR:

Yohan Szuszkó Soares

DOCENTE ORIENTADOR:

Cleber Renato Mendonça



sbfoton

CHAPTERS NO BRASIL



Entrega do *Student Chapter Excellence Award* por Donna Strickland (ao centro da foto) ao *Chapter*.



Seminário virtual com Anne L'Huillier, laureada com o Prêmio Nobel de Física de 2023, durante o SPIE *Talks* organizado pelos *Chapters*.



Evento *Ciência por Elas*, iniciativa dos *Chapters* dedicada à valorização da presença feminina na ciência e à promoção de um ambiente acadêmico mais inclusivo.

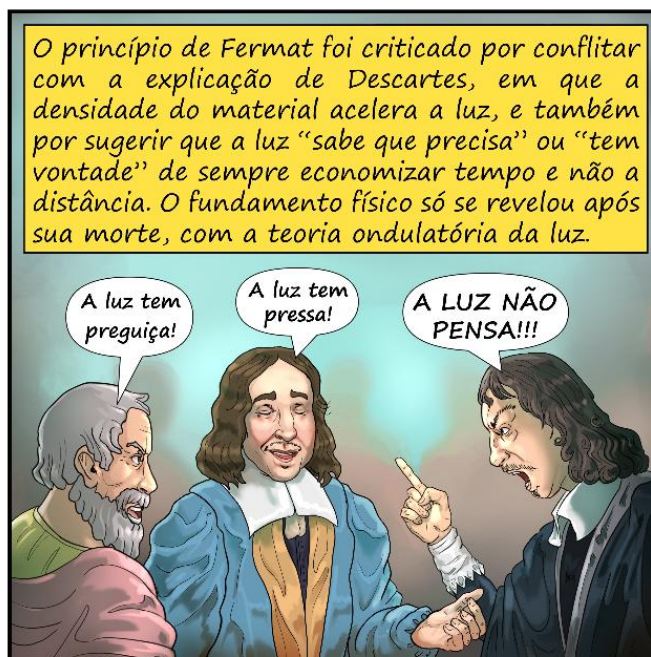
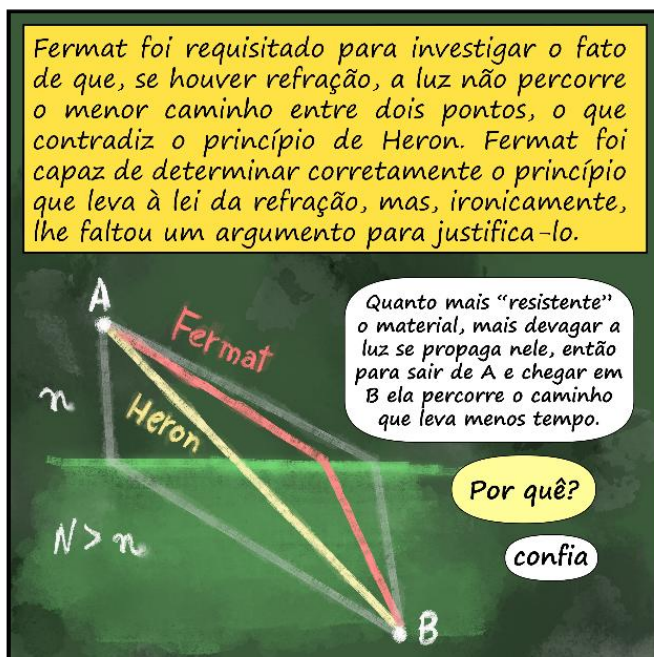
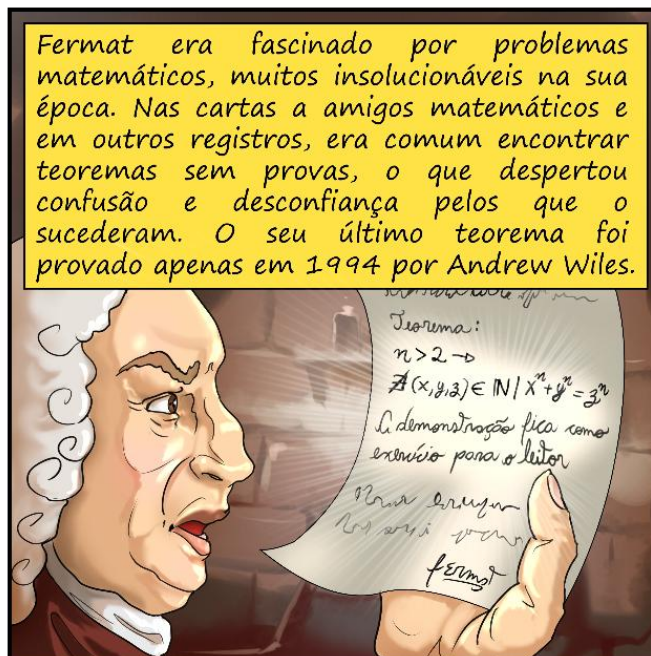
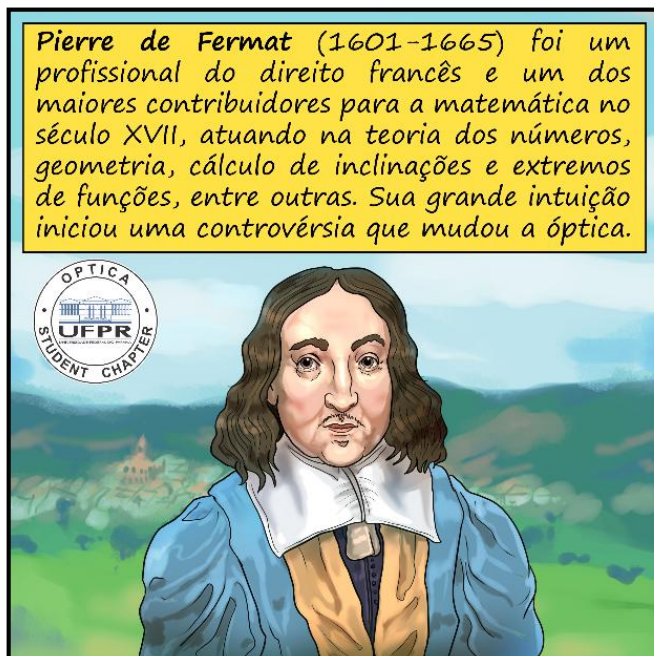


Ilustração: Marcelo Prado Cionek.
Roteiro: Marcelo Prado Cionek e Yohan Szusko Soares.

CRÉDITOS:

Maria Júlia de Arruda Mazzotti Marques

Espectroscopia multidimensional coerente como ferramenta de caracterização de nanoestruturas

Diogo B. Almeida¹, Luigi Pieri², Leonardo Barros², Lazaro A. Padilha²

¹ Universidade Federal do ABC (UFABC)

² Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

diogo.almeida@ufabc.edu.br

RESUMO: A crescente diversidade de tecnologias optoeletrônicas exige cada vez maior capacidade de investigação de suas propriedades. Com a espectroscopia multidimensional coerente, obtemos informações detalhadas sobre como as energias de excitação se correlacionam com as de emissão em nossas amostras. Aplicando a técnica no estudo de nanocristais, obtemos a largura de linha da emissão coerente, além de uma caracterização das trocas de energia com os fônons da rede, dentre outras dinâmicas de interesse. O espectro 2D nos permite separar a contribuição de estados excitados com diferentes energias de ressonância, nos permitindo superar a dificuldade de interpretação causada pela inhomogeneidade na amostra. Explorar o potencial dessa técnica pode trazer um salto no entendimento das propriedades optoeletrônicas coerentes de materiais promissores para aplicações em fotônica integrada e em tecnologias quânticas.

Palavras-chave: Espectroscopia Multidimensional Coerente, Óptica não-linear, nanomateriais.

ABSTRACT: The growing diversity of optoelectronic technologies demands an ever-increasing capacity to investigate their properties. With multidimensional coherent spectroscopy, we obtain detailed information on how excitation energies correlate with emission energies in our samples. Applying the technique to the study of colloidal nanocrystals, we obtain the linewidth of coherent emission, as well as a characterization of energy exchanges with lattice phonons, among other dynamics of interest. The 2D spectrum allows us to separate the contribution of excited states with different resonance energies, enabling us to overcome the difficulty of interpretation caused by inhomogeneity in the sample. Exploring the potential of this technique can bring a leap in the understanding of the coherent optoelectronic properties of promising materials for applications in integrated photonics and quantum technologies.

Keywords: Multidimensional Coherent Spectroscopy, Non-linear optics, Nanomaterials.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.21396660>

A popularização de sistemas de laser pulsados no regime de poucos femtossegundos, a partir da década de 1990, permitiu-nos observar a dinâmica de processos fotoinduzidos através das espectroscopias ópticas ultrarrápidas. Essa janela de tempo e frequências engloba diversos processos dinâmicos envolvendo portadores de carga como fotoluminescência, ionização por impacto, termalização de portadores, vibrações moleculares e decoerência de estados eletrônicos. Desse modo, a caracterização permitida pelas espectroscopias ultrarrápidas passa a ser essencial tanto para a evolução de tecnologias optoeletrônicas já existentes, quanto para tecnologias emergentes, notadamente as voltadas às energias renováveis e à computação, comunicação e sensoriamento quânticos.

Nas espectroscopias ultrarrápidas, monitoramos a dinâmica de propriedades de uma amostra através de sua resposta óptica não-linear, tipicamente de terceira ordem [1], fazendo-a interagir com uma sequência de pulsos ultracurtos. A técnica mais conhecida dessa família é o bombeio-e-prova (*pump-and-probe*). Numa típica medida, um primeiro pulso “bombeia” a amostra, excitando seus portadores de carga, mudando as distribuições de carga e populações de estados eletrônicos. Após um intervalo de tempo T , um segundo pulso “prova” a amostra fora de equilíbrio. Ao escanarmos o intervalo entre os pulsos, a variação da intensidade do feixe de prova após interagir com a amostra nos permite obter o perfil de relaxação dos portadores.

O sinal advindo da amostra pode ser detectado via um fotodiodo, recuperando a dinâmica dos portadores através do perfil de intensidade do sinal. Podemos também aproveitar o sinal espectralmente largo e efetuar a detecção com um espectrômetro, dando origem a um espectro de absorção transiente, que nos dá um panorama dos diferentes fenômenos fotoexcitados pelo bombeio e seu tempo de interação/recuperação. A técnica do bombeio-e-prova, mesmo sendo um enorme avanço frente a medidas de absorção linear, não nos fornece informações sobre a interação dos centros espalhadores da amostra com o pulso de bombeio e suas diferentes componentes espectrais.

Essa informação extra pode ser acessada ao dividirmos o pulso de bombeio em dois sub-pulsos. O intervalo de tempo (τ) entre os dois primeiros pulsos pode ser também varrido e, ao efetuarmos uma transformada de Fourier em função desse

intervalo, obtemos a resposta da amostra em função da frequência (energia) de excitação. Nesse esquema de 3 pulsos, o intervalo entre o segundo e o terceiro pulso, correspondente ao intervalo entre o bombeio e a prova, codifica a informação transiente sobre os estados de portadores excitados. O terceiro pulso ainda age como prova, induzindo a emissão de um sinal coerente de mistura de quatro ondas, M4O, após um intervalo (t). Um quarto pulso pode ser usado para interferir com o sinal, em um processo denominado detecção heteródina.

Nesse panorama a espectroscopia multidimensional coerente (EMC) pode ser considerada uma extensão do bombeio-e-prova ao fazermos uso do esquema de múltiplos intervalos de tempos, permitindo o acesso a uma vasta gama de assinaturas espectrais de decoerência e fenômenos de muitos corpos, mesmo na presença de alargamentos inhomogêneos.

Para termos acesso às informações codificadas nos campos elétricos em função dos atrasos entre pulsos, com resolução da ordem de femtossegundos, é necessária a caracterização completa desses campos elétricos, com amplitude e fase. Assim, a montagem experimental requer controle dos intervalos de tempo e estabilidade mecânica melhores do que os comprimentos de onda envolvidos. Tal imposição é atingida com várias estratégias instrumentais, como estabilização ativa dos caminhos ópticos ou escolha apropriada da geometria do experimento [2].

Pela sua natureza coerente, os intervalos de tempo entre os pulsos podem ser convertidos em eixos de energia (de excitação, evolução de população, emissão) por transformada de Fourier, gerando *plots* 2D ou até 3D [3].

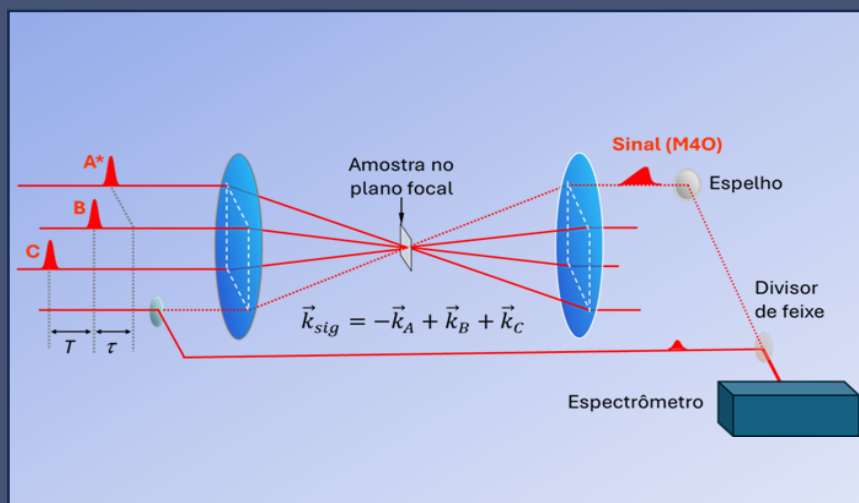


Figura 1: Ilustração de uma montagem experimental de EMC com geometria Box-CARS. Três pulsos atingem a amostra em diferentes instantes e são alinhados de modo a formarem três vértices de um quadrado. O sinal da amostra, devido ao casamento de vetor de onda, surge no quarto vértice do quadrado, separando o sinal dos pulsos laser. O sinal então é misturado com um oscilador local e detectado por um espectrômetro

A filtragem do sinal não-linear de uma montagem de EMC pode ser feita de várias formas. Na figura 1 abaixo, ilustramos uma montagem que utiliza o casamento do vetor de onda (*box-CARS*, nesse caso) para isolar espacialmente o sinal dos demais pulsos e direcioná-lo para o detector [4]. Existem outros arranjos geométricos para casamento de vetor de onda. Também é cada vez mais comum o de feixes colineares, nos quais o sinal é isolado através da variação da frequência de cada trem de pulso com moduladores acústico-ópticos e filtragem via *lock-in*.

Nanoestruturas compreendem uma classe de sistemas cujos componentes são submetidos a efeitos de confinamento quântico em ao menos uma de suas dimensões espaciais. Pequenas mudanças na topologia e arquiteturas desses sistemas se traduzem em modificações substanciais em suas propriedades optoeletrônicas, o que os faz atrativos para inúmeras tecnologias. Um dos grandes desafios enfrentados para sua aplicabilidade é intrínseco à fabricação de estruturas de dimensões reduzidas: a presença de flutuações das dimensões ao comparamos diferentes elementos do conjunto (e.g. distribuição de tamanho num aglomerado nanopartículas, flutuações na espessura de um filme fino ou poço quântico). Na caracterização optoeletrônica, isso se traduz num alargamento (inomogêneo) dos picos espectrais, dificultando substancialmente a caracterização da estrutura fina dos níveis de energia e demais interações sutis de muitos corpos (e.g. espalhamento elétron-fônon).

Com a sequência de pulsos adequada, a EMC é capaz de separar as contribuições homogêneas e inomogêneas do sinal, sanando uma das maiores dificuldades de se investigar amostras em um *ensemble*. Efetivamente, podemos obter, com uma amostra contendo inúmeras nanoestruturas, assinaturas espectrais sutis similares a espectroscopias de partícula única, mas com sinal intenso o suficiente para resolvermos sua dinâmica temporal.

O tipo de espectro mais adequado para isso é o chamado espectros de refasagem [2]. Nele, o primeiro pulso é conjugado (vetor de onda negativo) em relação aos outros dois e o intervalo entre o segundo e terceiro pulso, T , é fixado. A interação com os pulsos conjugados faz com que a evolução de fase da polarização induzida em cada espécie fotossensível da amostra pelos pulsos entre em sincronia novamente (o primeiro pulso coloca todos os dipolos emissores em sincronia em $t=0$) gerando um sinal denominado

“eco de fótons” [2]. Nesse momento em que todas as oscilações estão novamente em fase, obtemos a informação homogênea dos componentes da amostra.

Na figura 2, à esquerda, mostra-se um espectro 2D de refasagem de pontos quânticos de CdSe com casca de CdS, a uma temperatura de 4K. O eixo de excitação aparece invertido pois o primeiro pulso tem vetores de onda conjugado em relação aos demais.

Assinaturas espectrais ao longo da diagonal (linha pontilhada azul) correspondem a sinais de emissão de mesma energia à excitação (interações sem mudança de energia, como a zero *phonon line*, ZPL, nesse caso). Elementos fora da diagonal indicam troca de energia e acoplamentos entre estados, como éxciton-fônon e éxciton-éxciton.

Num espectro 2D de EMC, as respostas homogêneas e inhomogêneas do sinal se manifestam em direções perpendiculares. Ao selecionarmos uma fatia antidiagonal do gráfico (linha tracejada vermelha) estamos, efetivamente, isolando a resposta homogênea de uma subfamília de osciladores de mesma frequência ressonante.

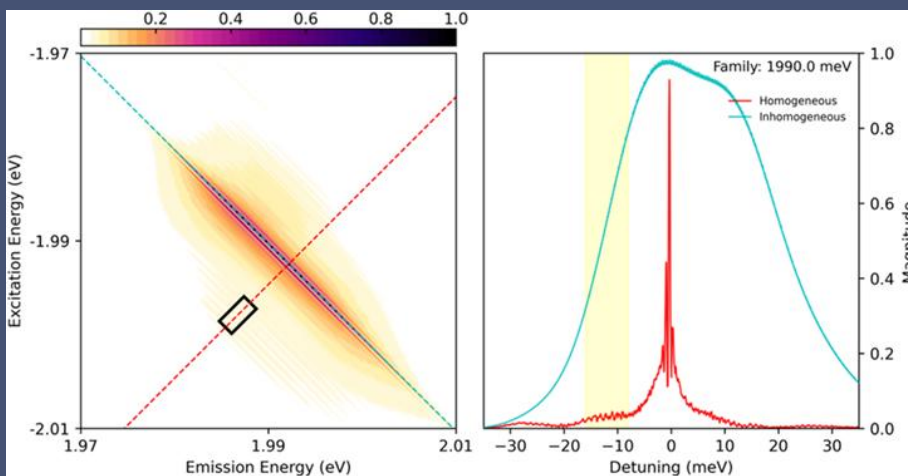


Figura 2: Espectros 2D de uma amostra de pontos quânticos de CdSe com casca de CdS com stress na interface à temperatura de 4K (esquerda). À direita: perfil da resposta homogênea de uma porção da amostra (vermelho) e de sua respectiva resposta inhomogênea (azul).

A Figura 2, à direita, mostra uma fatia diagonal correspondente à resposta inhomogênea do sistema (curva azul) e sua contrapartida homogênea (curva vermelha). Ao examinarmos a curva homogênea facilmente identificamos a ZPL, cuja largura nos oferece a medida direta tempo de decoerência do estado e um pedestal inferior correspondente ao espalhamento de fônons acústicos. Essa amostra em específico apresenta lobos laterais em -10 meV (separação entre buraco leve e pesado, indicando acoplamento) e -26 meV (fônon LO do CdSe). A ZPL está se subdividindo em outros picos,



o que atribuímos à quebra de degenerescência do estado no topo da banda de valência gerado pelo stress na interface do PQ. Essa descrição de apenas um espectro 2D ilustra a riqueza de informações que podemos obter da amostra, relevantes para a caracterização de sistemas de tecnologias quânticas.

Esses espectros foram obtidos num sistema montado no IFGW-Unicamp pelo primeiro e último autores deste trabalho e, até onde se sabe, é o único sistema no Brasil. Nesse trabalho, mostramos a versatilidade da técnica e a abrangência de sistemas passível de se beneficiar com esse tipo de caracterização. Essa família de técnicas é cada vez mais difundida no exterior, com sistemas comerciais disponíveis para compra e um dos objetivos desse trabalho é a apresentação da técnica e da divulgação de nosso sistema experimental para o crescimento local dessa comunidade.



REFERÊNCIAS

- [1] Cundiff, S. T., "Optical two-dimensional Fourier transform spectroscopy of semiconductor nanostructures", *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 29(2), A69-A81, 2012, <https://doi.org/10.1364/OE.16.004639>.
- [2] Smallwood, C. L. and S. T. Cundiff, "Multidimensional Coherent Spectroscopy of Semiconductors", *Laser & Photonics Reviews*, 12(12), 1800171, 2018, <https://doi.org/10.1002/lpor.20180017>.
- [3] Cundiff, S. T., "Optical three-dimensional coherent spectroscopy", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(18), 8193-8200, 2014, <https://doi.org/10.1039/C4CP00176A>.
- [4] Bristow, A.D., *et al.*, "A versatile ultrastable platform for optical multidimensional Fourier-transform spectroscopy" *Review of Scientific Instruments*, 80(7), 073108, 2009, <https://doi.org/10.1063/1.3184103>.

Biossensores plasmônicos: usando luz e nanoestruturas para encontrar biomarcadores

Jhonattan C. Ramirez¹, Jorge R. Mejía-Salazar²

¹ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG);

² Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)

jcordoba@cpdee.ufmg.br e jrmejia@inatel.br

RESUMO: A detecção de quantidades extremamente pequenas de biomoléculas, de forma rápida e confiável, é um desafio central em áreas como o diagnóstico médico, monitoramento ambiental e controle de qualidade de alimentos. Nesse contexto, os biossensores ópticos têm se destacado por sua capacidade de traduzir interações moleculares em mudanças mensuráveis na luz. Entre essas tecnologias, os biossensores plasmônicos chamam a atenção por concentrar campos eletromagnéticos em escalas nanométricas, o que aumenta significativamente a sensibilidade dos dispositivos. Este trabalho apresenta e discute uma plataforma plasmônica recentemente demonstrada que combina dois tipos de interação luz-matéria: ressonâncias localizadas em nanoestruturas metálicas e modos que se propagam ao longo de superfícies metálicas. Quando esses dois modos interagem de forma intensa, surge um novo comportamento coletivo, conhecido como anti-crossing, que permite um controle mais preciso da resposta óptica do sistema e aumenta sua sensibilidade a variações no ambiente. Resultados experimentais demonstram que essa abordagem pode alcançar sensibilidades até três ordens de grandeza superiores às de sensores plasmônicos convencionais. Esses resultados evidenciam como o desenho cuidadoso de nanoestruturas e o controle dos mecanismos de perda de energia podem ser explorados para otimizar o desempenho dos sensores. De forma geral, o trabalho ilustra como avanços em nanofotônica e plasmônica estão abrindo caminho para tecnologias de detecção cada vez mais sensíveis e versáteis.

Palavras-chave: Biossensores, Luz-matéria, Nanofotônica, Plasmônica, Sensoriamento Óptico.

ABSTRACT: Detecting extremely small amounts of biomolecules quickly and reliably is a major challenge in areas such as medical diagnostics, environmental monitoring, and food safety. Optical biosensors have emerged as a promising solution by translating molecular interactions into measurable changes in light. Among these technologies, plasmonic biosensors stand out for their ability to concentrate electromagnetic fields at the nanoscale, significantly enhancing detection sensitivity. In this work, we present and discuss a recently demonstrated plasmonic platform that combines two types of light-matter interactions: localized resonances in metallic nanostructures and propagating modes along metallic surfaces. When these two modes interact strongly, they give rise to hybrid states, a phenomenon known as anti-crossing. This effect enables improved control over the system's optical response and enhances its sensitivity to changes in the surrounding environment. Experimental results show that this approach can achieve sensitivities up to three orders of magnitude higher than conventional plasmonic sensors. These findings highlight how the careful design of nanostructures and the control of energy losses can be used to optimize sensor performance. Overall, this work illustrates how advances in nanophotonics and plasmonics are paving the way for more sensitive and versatile detection technologies.

Keywords: Biosensors, Nanophotonics, Optical Sensing, Plasmonics, Light-matter Interaction.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.21397997>

A capacidade de detectar rapidamente moléculas associadas a doenças, contaminações ambientais ou alterações na qualidade dos alimentos é um dos grandes desafios da ciência contemporânea. Em um mundo que demanda diagnósticos mais rápidos, acessíveis e precisos, os biossensores vêm ganhando destaque por transformar eventos biológicos, como a ligação entre uma proteína e um anticorpo ou entre duas fitas complementares de DNA, em sinais mensuráveis e interpretáveis. Esses dispositivos funcionam como tradutores entre o mundo molecular e o da informação. Quando uma molécula de interesse, chamada analito, se liga à superfície do sensor, essa interação provoca uma mudança física, química ou óptica. O papel do biossensor é converter essa mudança em um sinal detectável, permitindo identificar a presença do analito e, em muitos casos, estimar sua concentração. Entre as diferentes estratégias de detecção, os biossensores ópticos se destacam por monitorar alterações na propagação da luz [1].

Em vez de dependerem necessariamente de marcadores químicos adicionais, muitos desses dispositivos monitoram mudanças em propriedades como intensidade, comprimento de onda, fase ou índice de refração. Por isso, têm sido amplamente explorados em áreas como diagnóstico biomédico, monitoramento ambiental e controle de qualidade de alimentos. No contexto dos sensores ópticos, os dispositivos fotônicos ocupam uma posição especialmente promissora. Eles utilizam micro e nanoestruturas capazes de guiar, confinar ou intensificar a luz em regiões extremamente pequenas. Essa capacidade aumenta a interação entre a luz e as moléculas presentes na superfície do sensor, permitindo a detecção de quantidades muito baixas de biomarcadores. Em condições bem controladas, algumas plataformas ópticas já alcançam sensibilidade compatível com a detecção de moléculas individuais. No entanto, transformar esses avanços em aplicações da vida cotidiana ainda exige superar desafios importantes, como estabilidade, reprodutibilidade e desempenho em amostras reais [2].

Nos últimos anos, uma classe particular de dispositivos fotônicos tem recebido atenção crescente: os biossensores plasmônicos, baseados em nanoestruturas metálicas, geralmente feitas de ouro ou prata. Nesses materiais, a luz pode se acoplar às oscilações coletivas dos elétrons livres do metal, em um fenômeno conhecido como ressonância plasmônica de superfície. Quando isso ocorre, o campo eletromagnético fica fortemente concentrado nas proximidades da nanoestrutura, justamente na região onde

as moléculas de interesse podem se ligar. Como resultado, pequenas alterações no ambiente local, provocadas pela presença de uma proteína, um fragmento de DNA ou outro biomarcador, produzem mudanças ópticas detectáveis. É essa amplificação local da luz que torna os biossensores plasmônicos uma das plataformas mais promissoras para a detecção ultrasensível de biomoléculas. Seu potencial é particularmente relevante para o desenvolvimento de métodos de diagnóstico precoce, nos quais a quantidade de biomarcadores pode ser muito baixa, como ocorre em estágios iniciais de algumas doenças [1,3].

Em muitas arquiteturas de biossensores plasmônicos, utilizam-se nanopartículas metálicas nas quais os campos eletromagnéticos são fortemente confinados. Essas nanopartículas se comportam como nanoantenas, capazes de espalhar ou reirradiar a luz para o meio externo. Sua resposta a mudanças no índice de refração costuma ser muito intensa, o que as torna plataformas de detecção altamente eficientes. No entanto, os campos eletromagnéticos associados a essas estruturas ficam confinados a uma região extremamente fina próxima à superfície das partículas. Isso pode limitar sua resposta no caso de moléculas relativamente grandes ou de moléculas que não estejam aderidas exatamente à região da nanopartícula onde ocorre a maior amplificação de campo. Por outro lado, existe uma abordagem alternativa em que as ressonâncias plasmônicas não se comportam como antenas de campos localizados, mas se propagam ao longo das interfaces entre um metal e um dielétrico. Nessas estruturas, o campo costuma se distribuir por uma região mais extensa da superfície metálica do que nas nanopartículas, o que pode facilitar a detecção. Porém, as curvas de refletância utilizadas na medição tendem a ser largas e podem se sobrepor de forma significativa diante de variações muito pequenas na concentração do analito. Com isso, surge um problema de resolução que dificulta a identificação de pequenas mudanças na resposta óptica do sensor [1,2].

Para contornar esse problema, foram desenvolvidos recentemente biossensores que utilizam pirâmides de ouro fabricadas sobre filmes de ouro, permitindo a coexistência de plásmons localizados, associados ao comportamento de nanoantena das pirâmides, e plásmons propagantes, associados à superfície metálica [2]. Com isso, busca-se combinar as melhores características de ambas as abordagens. De fato, mais

do que coexistirem de forma independente, esses estados podem hibridizar-se na estrutura desenvolvida, isto é, formar estados resultantes da mistura dos dois tipos de modos presentes no sistema [4]. A estrutura desenvolvida é apresentada na Figura 1, que ilustra, na subfigura 1a, um esquema de um arranjo de estruturas piramidais e, na subfigura 1b, a imagem SEM das estruturas fabricadas. Essa configuração foi fundamental para viabilizar a investigação experimental das propriedades ópticas decorrentes da interação entre modos plasmônicos localizados e propagantes [4].

O avanço mais relevante nesse cenário é a demonstração experimental do regime de acoplamento forte entre modos plasmônicos localizados (LSPR) e modos plasmônicos propagantes (SPP), um fenômeno conhecido como *anti-crossing*.

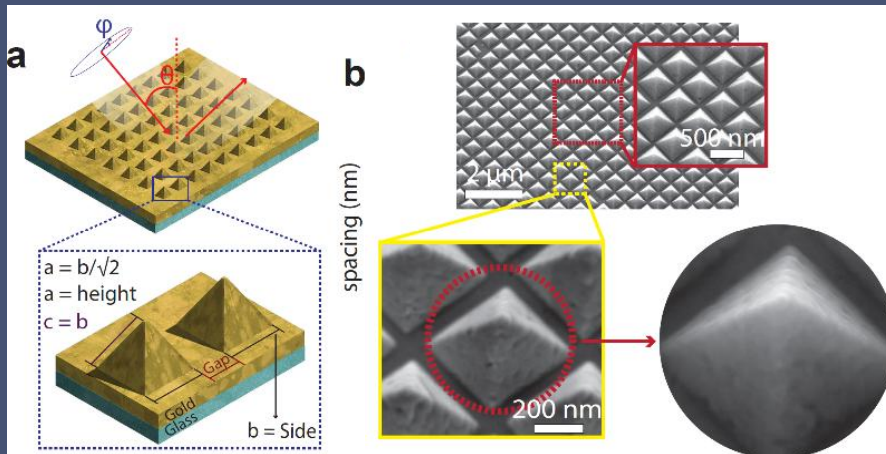


Figura 1: (a) Esquemático de um *array* de estruturas piramidais de ouro sobre um filme de ouro, evidenciando a configuração projetada para promover a coexistência e hibridização de modos plasmônicos localizados e propagantes [4]. (b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura (SEM) das estruturas piramidais fabricadas, confirmando a morfologia e distribuição do *array* [4].

Nesse regime, ocorre a formação de modos híbridos cujas propriedades ópticas, como a largura espectral e a intensidade do campo eletromagnético, tornam-se altamente sensíveis ao ambiente local. O trabalho apresentado fornece uma prova de conceito robusta ao avaliar experimentalmente o Limite de Detecção (LOD) desses dispositivos, alcançando uma sensibilidade de 1.546 nm/ $\mu\text{g/mL}$, valor aproximadamente três ordens de magnitude superior ao obtido em sistemas convencionais baseados apenas em LSPR [4].

Do ponto de vista físico, o regime de *anti-crossing* emerge do acoplamento forte entre modos distintos e caracteriza-se pela abertura de uma lacuna espectral (*splitting*), observável e quantificável experimentalmente. Esse comportamento só se manifesta quando há um equilíbrio adequado entre as taxas de perdas radiativas (γ_{rad}) e intrínsecas (γ_{int}), o que permite uma troca eficiente de energia entre os modos acoplados [5]. Conforme demonstrado no trabalho supracitado, o ajuste fino de parâmetros estruturais, em particular a geometria das nanoestruturas metálicas, possibilita controlar a largura dessa lacuna espectral e, conseqüentemente, otimizar o Limite de Detecção (LOD) do sensor. Nesse contexto, a engenharia precisa dos mecanismos de dissipação, aliada à caracterização experimental sistemática do dispositivo, constitui uma estratégia central para o desenvolvimento racional de biossensores plasmônicos de alta sensibilidade [5], [6].

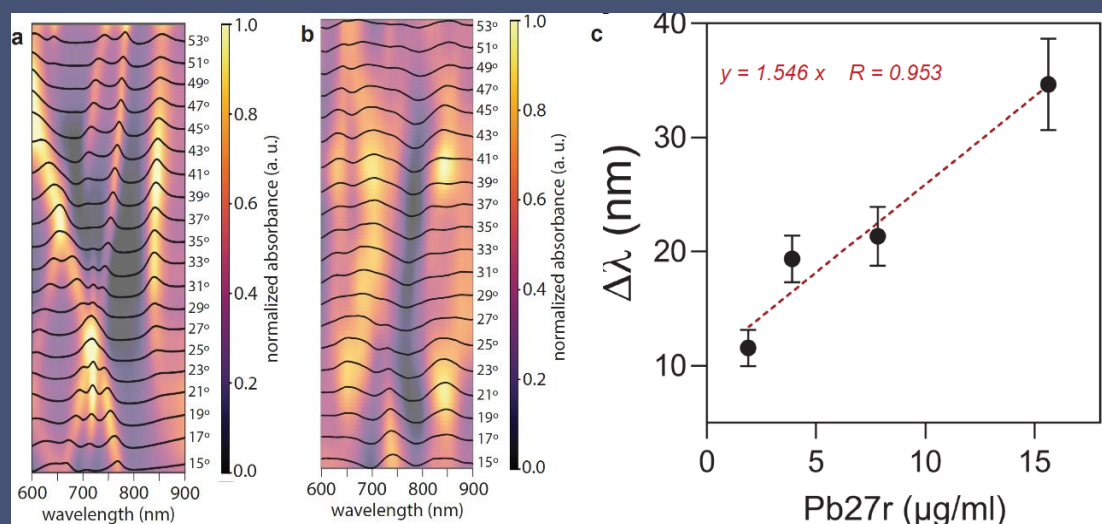


Figura 2: a) A resposta espectral medida para a rede de nanopartículas piramidais revela uma interação ajustável de acoplamento *plasmon-polariton* de superfície (SPP), fortemente dependente da ressonância plasmônica de superfície localizada (LSPR) em 850 nm. Um fenômeno de duplo anticruzamento é observado próximo a 725 nm, atribuído à interação entre dois modos LSPR e uma onda SPP. Além disso, nota-se um confinamento pronunciado no modo LSPR azul-deslocado, cuja energia aumenta progressivamente com o aumento do ângulo de incidência, em torno de 633 nm [4].

b) A mesma resposta espectral é observada para a rede de nanopartículas piramidais com albumina adsorvida na superfície do dispositivo, mantendo o comportamento ajustável de acoplamento SPP e o duplo anticruzamento próximo de 725 nm, porém com características espectrais modificadas pela presença da camada proteica.

c) A medição do $\Delta\lambda$ em função da concentração da proteína PB27R permite a obtenção do limite de detecção (LOD) do sensor, evidenciando sua sensibilidade para interações biomoleculares.



Embora outras formas de interação, como os acoplamentos plasmon–fônon e plasmon–éxciton, apresentem grande potencial e ampliem o espectro de aplicações desses dispositivos, ainda carecem de demonstrações experimentais sistemáticas e de avaliações quantitativas voltadas ao sensoriamento. O avanço nessas direções dependerá de estudos futuros que integrem modelagem teórica detalhada e validação experimental rigorosa, com foco na análise de desempenho em condições realistas de detecção óptica.

AGRADECIMENTOS

J.C.R., agradece o apoio financeiro através dos projetos Finep (SibratecNano, 01.13.0357.00, 0513/22), Fapemig (APQ-01602-21, APQ-02286-23, APQ-05305-23, APQ-00822-19), assim como também as instalações da UFMG (LCPNano e Centro de Microscopia), ao INCT IQNano, à CAPES e ao CNPq.

J.R.M.-S. agradece o apoio financeiro através dos projetos XGM-AFCCT-2024-3-1-1, apoiado pelo xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII-Inatel em Redes 5G e 6G, com recursos financeiros do PPI IoT/Manufatura 4.0 do MCTI (contrato nº 052/2023) assinado com a EMBRAPII. Os autores também agradecem o apoio financeiro das agências brasileiras Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq (308068/2025-4; 405014/2025-2), FAPEMIG (APQ-02782-25) e Finep (1060/24).



REFERÊNCIAS

- [1] Ramirez, J. C.; Ramirez-priego, P.; Lechuga, L. M. The Next Generation of Plasmonic Biosensors. *IEEE Sensors Rev.* 2026, 3 (March), 314–322. <https://doi.org/10.1109/SR.2026.3667091>.
- [2] Teixeira, *et al.*, “Advanced Computational Techniques for Plasmonic Metasurfaces in the Detection of Neglected Infectious Diseases”, *Anal. Chem.* 2025. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c04934>.
- [3] Sepúlveda, B.; Angelomé, P. C.; Lechuga, L. M.; Liz-Marzán, L. M. LSPR-Based Nanobiosensors. *Nano Today* 2009, 4 (3), 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2009.04.001>.
- [4] Marques, *et al.*, “Tunable Surface Plasmon-Polaritons Interaction in All-Metal Pyramidal Metasurfaces: Unveiling Principles and Significance for Biosensing Applications”, *ACS Appl. Opt. Mater.*, 2(7), 2024, 1374–1381. <https://doi.org/10.1021/acsaom.4c00170>.
- [5] Aigner, *et al.*, “Optical Control of Resonances in Temporally Symmetry-Broken Metasurfaces”, *Nature*, 644, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09363-7>.
- [6] Aigner, *et al.*, “Plasmonic Bound States in the Continuum to Tailor Light-Matter Coupling”, *Sci. Adv.*, 8 (49), 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add4816>.



Aparato didático de baixo custo para demonstração experimental de um sistema WDM

Luiz Henrique Bonani
CECS, Universidade Federal do ABC
luiz.bonani@ufabc.edu.br

RESUMO Este artigo aborda os detalhes da construção de um aparato didático de baixo custo para a demonstração experimental de um sistema WDM, constituído por um LED RGB como fonte de luz, um segmento de fibra óptica POF de PMMA como canal, um divisor de potência e filtros ópticos de absorção construídos com filmes BOPP (papel celofane) como demultiplexador e um fotorreceptor cujo projeto foi minuciosamente detalhado. Uma placa Arduino Uno foi utilizada para a geração de sinais, e conectores personalizados foram desenvolvidos para a interligação dos componentes, podendo ser fabricados por meio de impressão 3D. É um projeto totalmente replicável, com toda a descrição técnica disponível.

Palavras-chave: Aparato Didático, Comunicações Ópticas, Sistema WDM.

ABSTRACT: This article details the construction of a low-cost didactic apparatus for the experimental demonstration of a WDM system, consisting of an RGB LED as a light source, a segment of PMMA POF optical fiber as a channel, an optical power splitter, and optical absorption filters constructed with BOPP films (cellophane paper) as a demultiplexer, and a photoreceptor whose design was meticulously detailed. An Arduino Uno board was used for signal generation, and custom 3D-printable connectors were developed for interconnecting the components. It is a fully replicable project, with all technical descriptions available.

Keywords: Didactic Apparatus, Optical Communications, WDM System.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.21397343>



INTRODUÇÃO

A tecnologia de comunicações ópticas tem suas pedras fundamentais lançadas em 1960, com a invenção do laser [1], e em 1962, com o desenvolvimento do diodo laser [2][3] e a demonstração prática do diodo emissor de luz (LED) [4]. Com a demonstração da viabilidade de uma fibra óptica de baixas perdas para o envio de sinais ópticos em 1966 [5], foi possível o desenvolvimento dos primeiros sistemas ópticos de comunicação na década de 1970, com a disponibilidade de LEDs baratos e confiáveis, fibras ópticas comerciais de baixas perdas e lasers semicondutores operando à temperatura ambiente [6].

E assim, são essas fontes de luz – LEDs e lasers – que permitiram a evolução dos sistemas ópticos de comunicação ao longo dos últimos 50 anos, sem que nenhum outro meio físico tenha superado sua capacidade, medida pelo produto da taxa de bits pela distância alcançada. Esse aumento vertiginoso de capacidade se deve à utilização de estratégias de envio simultâneo de múltiplos sinais ópticos compartilhando a mesma fibra, a exemplo da multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*), que utiliza múltiplos canais padronizados pela ITU-T que trafegam por um mesmo meio óptico.

A estratégia WDM é uma tecnologia-chave para compreender a grande capacidade dos sistemas ópticos de comunicação, mas, ao mesmo tempo, sua implantação comercial depende de vários dispositivos de alto valor agregado e alto custo, como múltiplos lasers e moduladores (um para cada canal óptico), multiplexadores, fibras, demultiplexadores e fotorreceptores. Assim, a abordagem experimental dessa tecnologia torna-se um grande desafio quando o objetivo é didático, pois nem todo laboratório universitário dispõe da multiplicidade de dispositivos necessários. Além disso, quando disponíveis, muitas vezes não é possível replicar um experimento na escala necessária para que múltiplos alunos se beneficiem. Por fim, a segurança dos estudantes durante as práticas experimentais de comunicações ópticas frequentemente limita a manipulação direta de determinados dispositivos.

Dado este cenário, a próxima seção descreve um aparato didático de baixo custo, utilizando uma placa de prototipagem Arduino Uno como modulador de um LED RGB comum (fonte de luz). Esses sinais são enviados por um segmento de fibra óptica para iluminação (canal óptico), demultiplexados por um divisor de potência simples e por

filtros de absorção, e recuperados por um receptor óptico cujo componente principal é um fotodiodo. Para as interligações entre os componentes desse setup foram projetados conectores personalizados que podem ser construídos em uma impressora 3D. O resultado é um conjunto experimental acessível e replicável por qualquer interessado, que permite demonstrar um sistema WDM e possibilita a abordagem didática de outros conceitos básicos de sistemas ópticos de comunicação.

DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

O aparato didático é constituído por uma fonte de luz, um canal óptico, um demultiplexador com filtros de absorção e um fotorreceptor. Nas subseções a seguir, serão discutidos os detalhes de cada componente.

Transmissor óptico

Um LED RGB, que emite luz nas cores vermelha (R), verde (G) e azul (B), é a fonte de luz escolhida para a demonstração do sistema WDM. Os LEDs têm sido utilizados em larga escala desde os primeiros sistemas ópticos de comunicação, não tendo perdido seu apelo em determinados cenários devido à sua confiabilidade, vida útil, ótima compatibilidade com fibras multimodo e baixo custo de produção e de utilização.

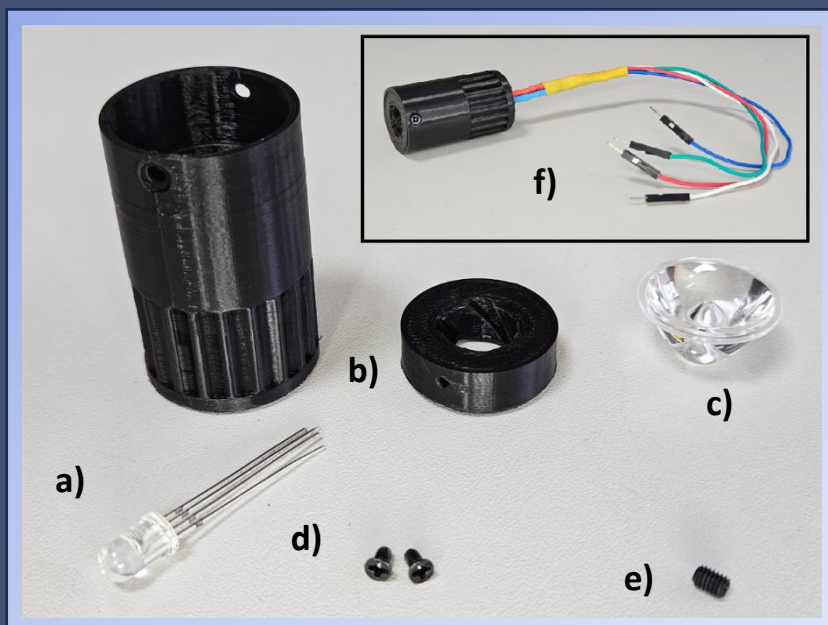


FIGURA 1: Transmissor óptico: a) LED RGB; b) visão das duas partes do corpo impresso em 3D; c) lente convergente de 5°; d) parafuso M2 de 5 mm para junção do corpo da transmissão; e) parafuso Allen M3 sem cabeça de 4 mm para fixação do LED no corpo do transmissor, usando o chanfro; f) Transmissor com suas conexões elétricas (resistores são soldados aos terminais do LED).

O feixe de luz proveniente do LED é colimado por meio de uma lente convergente, com ângulo de saída de 5°, para melhor acoplamento à fibra óptica. O conjunto é integrado a um corpo plástico fabricado em impressora 3D e dotado de conector

helicoidal fêmea, projetado especificamente para esta atividade didática experimental. O material usado para a construção do protótipo foi PLA; porém, é possível que outros tipos de filamento sejam utilizados. Esta estratégia permite que o próprio conjunto do transmissor óptico atue como um multiplexador, injetando simultaneamente três faixas de comprimentos de onda (cores) no mesmo canal óptico. A Figura 1 mostra os detalhes do transmissor, com o LED, a lente, a visão do corpo do transmissor RGB, suas conexões elétricas e a conectorização óptica fabricada em impressora 3D. Dois parafusos com rosca M2 e 5 mm de comprimento foram usados para fixar as duas partes do corpo do transmissor, e um parafuso Allen M3, sem cabeça, com 4 mm de comprimento foi usado para fixar o LED no corpo do transmissor, utilizando o chanfro do componente. As peças em questão já preveem os furos para os parafusos no projeto para impressão.

Tabela 1 – Especificações do LED RGB

Característica	Especificação
Encapsulamento	5 mm com lente transparente
Ângulo de espalhamento	30°
Emissão espectral	R: 620-625 nm; G: 515-520 nm; B: 450-455 nm
Intensidade luminosa	R: 2000-3000 mcd; G: 15000-18000 mcd; B: 7000-8000 mcd
Tensão de polarização	R: 2,0-2,2 V; G/B: 3,0-3,2V
Corrente máxima	20 mA por cor
Resistores série	R: 470 Ω ; G/B: 820 Ω
Conexões	ânodo: cabo branco; cátodo R: cabo vermelho; cátodo G: cabo verde; cátodo B: cabo azul

As especificações do LED RGB utilizado estão descritas na Tabela 1, sendo basicamente um LED com ânodo (polo positivo) comum e resistores em série, cujos valores foram escolhidos para um melhor balanceamento de potência em cada terminal. As cores dos cabos foram escolhidas para coincidir com a cor da luz emitida e terminam com conectores *Modu* machos. A luz emitida pelo transmissor, em cada uma das cores, pode ser modulada por uma onda gerada por uma placa de prototipagem Arduino Uno ou por qualquer outra com características semelhantes. A possibilidade de utilizar um LED com cátodo (polo negativo) comum também existe e só demandaria algumas alterações nas ligações ao Arduino Uno e no código utilizado para a geração dos sinais a serem enviados simultaneamente pelo canal óptico.

Canal óptico

O canal óptico será composto por um segmento de 3 metros de fibra óptica POF (*Plastic Optical Fiber*) de PMMA (*polimetilmetacrilato*), usada para iluminação, com brilho final (*end glow*). Este tipo de fibra é de fácil acesso e de baixo custo. Deve-se notar que a escolha da característica de brilho final é importante para evitar que parte da potência escape pela casca, garantindo que, em geral, a propagação ocorra apenas pelo núcleo da fibra óptica. Cada segmento de fibra é dotado de dois conectores helicoidais, macho e fêmea, em cada extremidade, projetados para este aparato e fabricados por meio de impressão 3D.

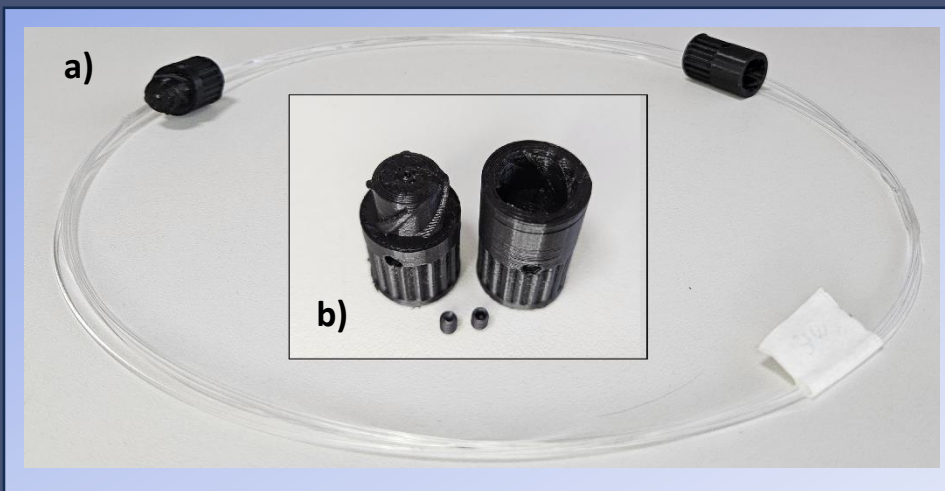


FIGURA 2: a) segmento de fibra óptica POF PMMA dotado de dois conectores helicoidais macho e fêmea construídos com impressora 3D; b) detalhe dos conectores, com seus parafusos de fixação para as fibras.

A plataforma de criação de sólidos *Tinkercad* [7] foi usada para projetar os conectores e teve projetos disponíveis como inspiração inicial, mas que foram completamente projetados de outra forma, principalmente no que se refere ao método de travamento das conexões, que se dá por acúmulo de atrito e rotação. A fibra óptica adotada possui diâmetro de 1000 μm e núcleo de 980 μm . Apesar da dificuldade em encontrar dados técnicos específicos sobre as fibras, em geral, apresentam abertura numérica de 0,47, índice de refração do núcleo de aproximadamente 1,49 e atenuação da ordem de 0,5 dB/m.

Os conectores helicoidais foram projetados especificamente para a dimensão das fibras ópticas utilizadas e levam em conta sua fixação por meio de parafusos Allen M3, sem cabeça, com 4 mm de comprimento. Os conectores podem se conectar entre si (macho e fêmea), bem como aos módulos do transmissor, do receptor e do demultiplexador. A Figura 2 mostra o projeto de ambos os conectores, bem como um

segmento de fibra óptica pronto para uso. As fibras POF PMMA não passam pelo processo de clivagem, mas uma boa conexão requer um corte reto, seguido de lixamento em etapas, começando com lixa d'água 400 e chegando a 2500.

Demultiplexador

Para que o experimento de WDM seja possível, é necessário dividir a potência em três partes e filtrar os componentes espectrais da luz para obter, individualmente, os três comprimentos de onda (cores) de interesse. A divisão de potência foi obtida de maneira elementar, por meio da sobreposição do núcleo da fibra óptica de transmissão aos núcleos de outras três fibras ópticas no próprio demultiplexador, aproveitando o fato de essas fibras apresentarem abertura numérica elevada. Para tanto, um conector macho foi construído com este propósito específico. Outras possibilidades de construir o divisor de potência de forma simples serão testadas no futuro. Após a divisão de potência, as três fibras passam por um processo de filtragem para selecionar o comprimento de onda (cor) de interesse.



FIGURA 3: a) módulo demultiplexador completo, composto por três fibras, com b) detalhe do conector de entrada e c) detalhe dos conectores de saída com seus respectivos filtros de cor feitos a de filmes BOPP.

A filtragem é realizada por meio da inserção de filtros de absorção constituídos por filmes BOPP (*polipropileno biorientado*), de fácil obtenção e comumente conhecidos como “papel celofane” em conectores fêmeas. Como o LED gera três ondas moduladas nos comprimentos de onda correspondentes às cores vermelha, verde e azul, são necessários filmes nas mesmas cores para a construção do filtro e separação dos comprimentos de onda. A Figura 3 apresenta o demultiplexador, destacando o divisor de potência e os filtros de cor.

Receptor óptico

O módulo receptor é composto por um circuito de fotodetecção, seguido de um circuito com amplificador de áudio. O principal componente do circuito fotodetector é um fotodiodo de silício do tipo PIN, modelo SFH203P, com encapsulamento de 5 mm e responsividade. Este componente foi escolhido por apresentar boa responsividade na região da luz visível, conforme dados técnicos fornecidos pelo fabricante. O circuito de fotodetecção é projetado em dois estágios: o primeiro é um amplificador de transimpedância que converte a potência óptica recebida pelo fotodiodo em um nível de tensão. Portanto, este circuito faz com que a tensão de saída seja proporcional à potência óptica recebida. O segundo estágio é um circuito amplificador na configuração inversora, com ganho de aproximadamente -10, de modo a recuperar a fase original do sinal enviado. Os dois estágios do circuito de fotodetecção foram projetados com o chip OPA2134, que possui dois amplificadores operacionais encapsulados, largura de banda de 8 MHz e baixos níveis de distorção. A alimentação deve ser simétrica para evitar limitações de sinal e foi realizada com ± 9 V, fornecidos por baterias. Possivelmente, podem-se usar fontes simétricas para o mesmo propósito, visto que foram introduzidos capacitores de desacoplamento na entrada de alimentação dos chips. Foi construído um conector macho helicoidal para acomodar o fotodetector e mantê-lo preso por meio de seu chanfro e de um parafuso Allen sem cabeça M3 com 2 mm de comprimento.

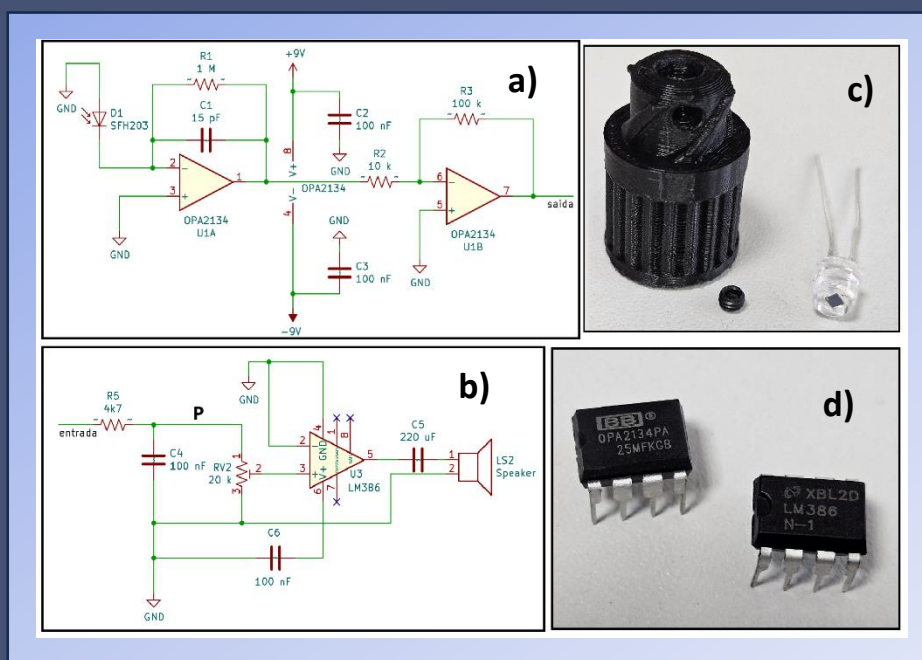


FIGURA 4: a) esquemático do circuito fotodetector; b) esquemático do circuito amplificador de áudio com filtro passa-baixas; c) fotodiodo SFH203P e detalhe de seu conector helicoidal; d) circuitos integrados OPA2134 e LM386 (DIP8) usados no fotorreceptor.

Alguns cuidados especiais para o desenvolvimento do projeto são: a resistência do resistor R1 deve ser suficientemente alta para gerar uma tensão em resposta à fotocorrente do fotodetector. Porém, valores elevados de resistência podem acarretar excesso de ruído térmico, comprometendo o processo de fotodetecção. Já o capacitor C1 atua na estabilidade do processo de fotodetecção, e o ideal é que tenha um valor entre 10 e 50 pF. Uma vez que, juntamente com o resistor R1, C1 forma um filtro passa-baixas que limita a largura de banda de operação, valores altos de capacitância tendem a suavizar as transições de sinal, o que é problemático para certas aplicações. Porém, valores muito baixos dessa capacitância tendem a tornar o processo de fotodetecção mais instável, com o aparecimento de sinal residual mesmo na ausência de luz incidente. Para o protótipo, sugere-se um valor de 22 pF para C1. Tanto C1 como o fotodiodo devem ser colocados o mais próximo possível do OPA2134 para diminuir a influência indesejada de capacitâncias parasitas.

O circuito receptor ainda é composto por um filtro passa-baixas de primeira ordem, com frequência de corte teórica de aproximadamente 338 Hz, que suaviza as transições de um sinal de áudio retangular. Esse sinal é injetado em um amplificador de áudio composto por um chip LM386, ligado a um alto-falante com impedância de 8 Ω e 0,5 W de potência. O volume do áudio recuperado pode ser ajustado por meio de um *trimpot* de 20 k Ω . Os circuitos descritos foram desenvolvidos com montagem em placa de prototipagem padrão e *protoboard*, com detalhes apresentados na Figura 4. Embora não testado, foi gerado um projeto de PCB para o circuito do fotorreceptor, no qual os circuitos fotodetector e o amplificador de áudio são conectados por um jumper.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O experimento tem início com o carregamento do código disponível em [8]. Este código gera três sinais de áudio diferentes e simultâneos a partir da variação das frequências e das durações de ondas retangulares, de acordo com as melodias escolhidas. Os vetores de frequência e de duração foram gerados a partir dos códigos originais disponíveis em [9]. O esquema adotado corresponde a uma forma de modulação por duração de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*), mas não é necessário usar uma porta PWM do Arduino Uno. Como a onda gerada é essencialmente quadrada, aplicou-se um filtro passa-baixas na entrada do amplificador de áudio para atenuar as

transições. Por questões de simplicidade e de custo, um mesmo circuito receptor foi usado, alternando sua ligação nas três portas de saída do demultiplexador.

Foram escolhidas as melodias referentes a três trechos de músicas clássicas bastante conhecidas para serem transmitidas. Assim, o primeiro sinal gerado é um trecho da música “Ode à Alegria”, que integra a Nona Sinfonia de Beethoven. O segundo sinal gerado é um trecho da música “Greensleeves”, de autor desconhecido e datada do final do século XVI. O terceiro sinal gerado é um trecho da música “Minueto em Sol Maior”, composta por Christian Petzold por volta de 1720 e popularizada por Johann Sebastian Bach por sua presença na coletânea “Caderno de Anna Magdalena Bach”.

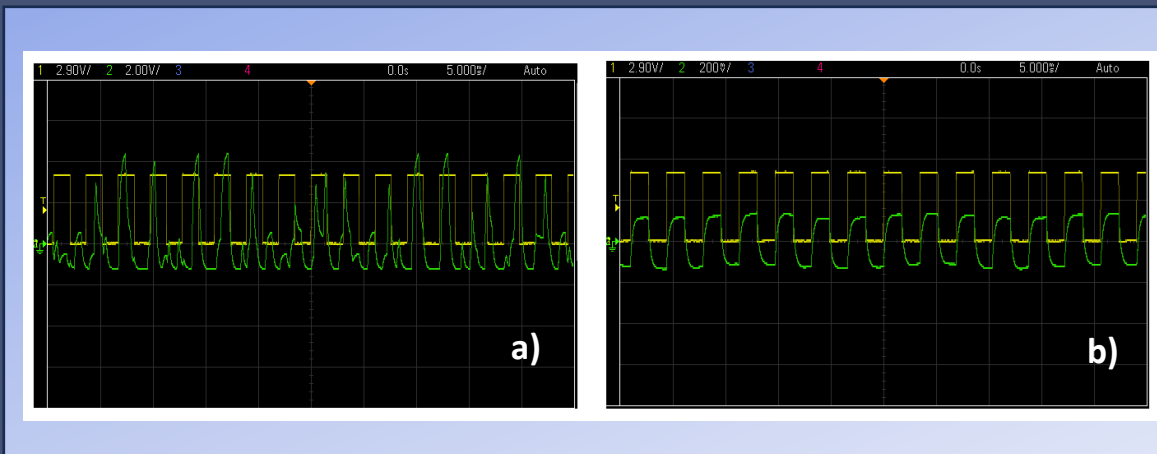


FIGURA 5: Em verde: a) sinal com a saída da fibra óptica conectada diretamente ao circuito fotorreceptor (sem o demultiplexador); b) usando uma das portas do demultiplexador. Em amarelo: referência de um dos sinais gerados pelo Arduino Uno.

Questões conceituais a serem observadas são as cores da luz obtida na saída do transmissor, tanto quando cada canal (cor) é modulada separadamente (ligando e desligando os terminais do transmissor da placa arduino Uno) quanto quando todos os canais (cores) são modulados simultaneamente, com todos os terminais do transmissor ligados ao arduino Uno. Além disso, o áudio recuperado é uma ótima métrica para avaliação da prova de conceito. A Figura 5a mostra, em verde, o sinal obtido na saída do filtro passa-baixas (ponto P na Figura 4b) quando a saída da fibra óptica é conectada diretamente ao circuito do fotorreceptor (sem o demultiplexador, e, portanto, com a influência simultânea de todos os canais no receptor). Em amarelo está a referência de um dos sinais gerados pelo Arduino Uno. Já a Figura 5b mostra o resultado quando o demultiplexador é utilizado para filtrar um dos canais de cor. Nesse caso, a entrada do fotodetector é ligada à saída de uma das portas do demultiplexador. O áudio obtido também é de grande valor didático na comparação dos resultados.

Algo inicialmente não previsto na concepção do experimento é que a recuperação de um dos canais sofreu interferência de um canal adjacente, percebida em áudio como um sinal de fundo fraco, composto por outra melodia. Isso provavelmente ocorre porque o filtro BOPP utilizado não corresponde exatamente à faixa de comprimentos de onda requerida. Com isso, foi possível demonstrar o conceito de interferência intercanal (ICI - *Inter-Channel Interference*) em WDM e, inclusive, medir o nível dessa interferência por meio de um procedimento experimental adequado usando o osciloscópio.

Não são apresentados detalhes adicionais do experimento, a fim de preservar os resultados obtidos, para possíveis roteiros experimentais que usem esse aparato. É importante relatar que tentou-se transmitir voz em um dos canais. Porém, como é necessária uma alta taxa de amostragem para preservar o conteúdo espectral, o hardware do arduino Uno não suportou a demanda e passou a introduzir *jitter* nos demais canais. Mudanças de hardware para arquiteturas como a ESP32 são consideradas e podem ser úteis para futuras aplicações, desde que se usem conversores de nível lógico de 3,3 V para 5 V, devido à alimentação do LED RGB.

CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentaram-se todos os detalhes da implementação de um aparato didático de baixo custo e escalável para a demonstração experimental de um sistema WDM. Os resultados do experimento foram discutidos e o conceito pôde ser validado. Além disso, é importante destacar que o mesmo aparato, quando aplicado a diferentes cenários, pode ser utilizado para abordar outros conceitos pertinentes a sistemas ópticos de comunicação.

APÊNDICE

Com o intuito de tornar acessível a construção do aparato didático descrito, está sendo disponibilizado o código para Arduino para a geração das ondas, no qual consta a pinagem para a ligação do módulo transmissor. Da mesma maneira, um arquivo com as referências de fornecedores dos principais componentes, um arquivo com o esquemático do circuito, arquivos de projeto para a PCB e projetos de conectores em STL para impressão 3D também estão disponíveis no repositório [8].



AGRADECIMENTOS

O autor agradece a leitura e os comentários dos professores Eric Alberto de Mello Fagotto e Marcelo Luis Francisco Abbade

REFERÊNCIAS

- [1] T. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby”, *Nature*, Vol. 187, pp. 493–494, 1960. <https://doi.org/10.1038/187493a0>.
- [2] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T.J. Soltys, R. O. Carlson, “Coherent Light Emission From GaAs Junctions”, *Physical Review Letters*, Vol. 9, No. 9, pp. 366-368, 1962. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.9.366>.
- [3] M.I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, G. Lasher; “Stimulated Emission of Radiation from GaAs p-n Junctions”, *Appl. Phys. Lett.* 1, Vol 1, No. 3, pp. 62-64, 1962. <https://doi.org/10.1063/1.1777371>.
- [4] N. Holonyak, S. F. Bevacqua, “Coherent (visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions”, *Appl. Phys. Lett.* 1, Vol. 1, No. 4, pp. 82-83, 1962. <https://doi.org/10.1063/1.1753706>.
- [5] K.C. Kao, G.A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies”, *Proc. of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 113, No. 7, pp. 1151 – 1158, 1966. <https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189>.
- [6] L. H. Bonani, E. A. M. Fagotto, M. L. F. Abbade, “Sistemas de comunicação ótica: do surgimento à maturidade”, *Revista da SBFoton*, Vol 3, pp-27-39, 2023. <http://doi.org/10.5281/zenodo.14890678>.
- [7] Autodesk Tinkercad, <https://www.tinkercad.com>, Acesso em 01/05/2026.
- [8] Luiz H. Bonani, “Aparato Didático de Baixo Custo para Demonstração Experimental de um Sistema WDM (Arquivos)”, *Mendeley Data*, V1, 2026. <https://doi.org/10.17632/d2dykfr4fd.1>.
- [9] Músicas para Arduino, <https://dragaosemchama.com/2019/02/musicas-para-arduino/>, Acesso em 01/05/2026.



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 8 - Jul/2026

